

引用格式:张璐科,暴家良,李晓华,等.轨道交通杂散电流对交流电网变压器偏磁直流影响因素分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):79-91.

Citation: ZHANG Luke, BAO Jialing, LI Xiaohua, et al. Factors of stray current in rail transit affecting DC magnetic bias of AC power grid transformer [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 79-91.

轨道交通杂散电流对交流电网变压器偏磁 直流影响因素分析

张璐科¹, 暴家良², 李晓华¹, 陈璐³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网河南省电力公司安阳供电公司, 河南 安阳 455000;

3. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要:城市轨道交通杂散电流在大地中流动分布时会侵入附近交流电网变压器。为研究不同土壤特性下轨道交通杂散电流对沿线变电站的偏磁影响,基于上海某变电站及其邻近轨道交通系统,利用CDEGS软件建立城市轨道交通-交流电网变电站耦合仿真模型,对不同混凝土、土壤电阻率下杂散电流对交流电网变压器偏磁直流影响进行研究,并利用土壤等电流密度幅值分布曲线,结合可视化技术显示杂散电流的影响范围与流通过径。结果表明,混凝土电阻率和土壤电阻率对钢轨泄漏电流空间电场分布和变压器中性点偏磁直流影响存在较大差异。在仿真模型中,杂散电流的最大影响范围为1421.33 m,以分布距离与土壤电阻率的微分作为土壤电阻率对杂散电流流动范围影响指标,土壤电阻率最大为1.42 m/($\Omega \cdot m$)。列车启动33 s后行至500.3 m位置处,土壤电阻率对变电站中性点偏磁直流影响最大,可达0.003431 A/($\Omega \cdot m$)。

关键词:地铁杂散电流;偏磁直流;耦合仿真;CDEGS;动态变化;土壤电阻率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.009 中图分类号: TM401+.1 文章编号: 1673-9140(2024)06-0079-13

Factors of stray current in rail transit affecting DC magnetic bias of AC power grid transformer

ZHANG Luke¹, BAO Jialing², LI Xiaohua¹, CHEN Lu³

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Anyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Anyang 455000, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The flow distribution of stray current in urban rail transit in the ground makes it intrude into the nearby alternating current (AC) power grid transformer. In order to study the influence of stray current in rail transit on the magnetic bias of substations along the line under different soil characteristics, based on a substation in Shanghai and its nearby rail transit system, CDEGS software is used to establish the coupling simulation model of "urban rail transit-AC power grid substation", so as to study the influence of stray current on the direct current (DC) magnetic bias of the AC power grid transformer under different concrete-soil resistivity. The distribution curve of soil iso-current density amplitude is used, combined with visualization technology, to display the influence range and flow path of stray current. The results show that there is a big difference in the influence of concrete resistivity and soil resistivity on the spatial electric field distribution of the leakage current of the rail and the DC magnetic bias of the neutral point of the transformer. In the simulation model, the maximum influence range of stray current is 1421.33 m, and the differential of distribution distance and soil resistivity is used as the influence index of soil resistivity on the flow range of stray current. The maximum soil resistivity is 1.42 m/($\Omega \cdot m$). When the train moves 500.3 m after 33 s, the soil resistivity has the greatest influence on the DC magnetic bias of the neutral point of the substation, which can reach 0.003431 A/($\Omega \cdot m$).

Key words: stray current in subway; DC magnetic bias; coupling simulation; CDEGS; dynamic change; soil resistivity

收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2024-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51607110)

通信作者: 李晓华(1974—), 女, 博士, 主要从事交流电网变压器偏磁直流和永磁同步电机振动噪声研究; E-mail: 1719885294@qq.com

随着城市轨道交通不断普及,地铁运行不可避免会导致钢轨电流泄漏到大地中^[1-3],这些杂散电流以场的形式在土壤中流动分布^[4],会造成附近钢筋腐蚀,管道过电压,或侵入附近交流电网,引起变压器偏磁现象^[5-7]。杂散电流流动分布的大地由均匀相邻的胶结物与不同形状的土壤或岩石颗粒组成,且土壤中水分含量、电解质溶液性质和浓度、温度、外加电场频率和强度均会对土壤导电特性造成较大影响^[8-11],决定大地导电特性的指标以电阻率表示^[12]。现在钢轨多采用悬浮铺设,通过紧固件固定在混凝土结构层,钢轨紧固件构成对地电导的主要元素,轨道交通侧混凝土、土壤电阻率的大小及组合方式会引起杂散电流在大地中的分布差异,对钢轨杂散电流的总泄漏量、杂散电流的影响范围、变电站变压器中性点偏磁直流大小均会有较大影响,因此,有必要对不同混凝土、土壤电阻率下轨道交通杂散电流在土壤中的空间分布及其对沿线变电站变压器的偏磁影响进行研究。

针对城市轨道交通杂散电流有很多研究,文献[13]通过推导“钢轨-排流网-大地”电阻网络解析模型,较大程度地显示了轨道交通侧钢轨、排流网的电压、电流分布;文献[14]基于CDEGS软件提出一种减少模型纵向导体数量,降低模型导体分段节点总数的长线路杂散电流仿真建模方法;文献[15]通过双向可变电阻模块模拟列车不同工况下的运行规律,为研究杂散电流与轨道电位的动态分布提供思路;文献[16]提出一种考虑逆变回馈装置交流侧电压波动系数和牵引变电所多状态切换的城市轨道交通交直流统一潮流计算算法;文献[17]研究了钢轨沿线不同土壤电阻率对杂散电流的影响,但本质上是研究不均匀过渡电阻对杂散电流的影响,对杂散电流在土壤中的分布特性涉及较少;文献[18]证明了轨道交通系统与沿线变电站的相对位置及列车不同运行工况均会对杂散电流分布产生影响,侵入变压器的偏磁电流会导致变压器励磁电流波形发生畸变、温度升高以及振动噪声增大,严重影响变压器的正常运行^[19-21]。

目前,针对不同土壤特性影响轨道交通杂散电流从而引起沿线变电站偏磁现象的研究较少,对不同混凝土、土壤电阻率下钢轨杂散电流的影响范围及回流路径几乎没有涉及。本文依据杂散电流侵入交流电网变压器流路径,研究混凝土、土壤电阻率对整个过程的影响。首先,基于地铁双边供电

电阻网络解析模型对杂散电流引起变压器偏磁直流的机理进行理论推导;然后,建立城市轨道交通-交流电网变压器耦合仿真模型,对不同土壤环境下杂散电流及城市轨道交通系统各结构层次电位、电流分布进行研究,并创新性地利用CDEGS软件在轨道侧设置观测网,用求取电流密度幅值等位线的方式显示不同土壤环境下杂散电流影响范围及回流路径,同时对不同混凝土、土壤电阻率下地铁动态运行时变压器中性点偏磁直流分布规律进行研究。

1 城市轨道交通杂散电流侵入交流电网变压器机理分析

1.1 城市轨道交通杂散电流分析

本文基于地铁双边供电电阻网络解析模型对城市轨道交通侧杂散电流及各结构层次电位、电流进行理论推导,轨道交通系统模型包括“钢轨-排流网-结构钢筋-大地”4层结构,两侧牵引变电站均向列车供给牵引电流,以列车位置为中心分为左右两侧供电区间,该双边供电模型中两端牵引变电站等效为电流源,钢轨、排流网、结构钢筋等效为纵向电阻,如图1所示。

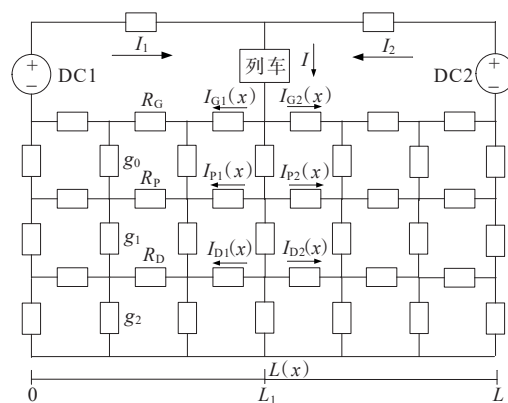


图1 双边供电电阻网络模型

Figure 1 Bilateral power supply resistance network model

图1中, I 为机车电流,A; I_1 、 I_2 分别为变电所1、2提供的牵引电流,A; L 为钢轨全长,km; L_1 为钢轨中点位置,km; $L(x)$ 为列车位置,km; R_G 、 R_P 、 R_D 分别为钢轨、排流网、结构钢筋纵向电阻, $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; g_0 、 g_1 、 g_2 分别为钢轨、排流网、结构钢筋对地过渡电阻, $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $I_{G1}(x)$ 、 $I_{P1}(x)$ 、 $I_{D1}(x)$ 分别为 $0 \leq x \leq L(x)$ 供电区间内 x 位置处的钢轨、排流网、结构钢筋电流,A; $I_{G2}(x)$ 、 $I_{P2}(x)$ 、 $I_{D2}(x)$ 分别为 $L(x) < x \leq L$ 供电区间内 x 位置处的钢轨、排流网、结构钢筋电流,A。

两侧牵引变电站向列车供给的牵引电流随列车行驶位置发生变化,导致列车处左右两侧供电区间($0 \leq x \leq L(x)$ 、 $L(x) < x \leq L$)钢轨回流电流大小存在差异。对图 1 所示的轨道交通 4 层结构双边供电电阻网络模型推导如下:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{I \cdot (L - L(x))}{L} \\ I_2 = \frac{I \cdot L(x)}{L} \end{cases} \quad (1)$$

在 $0 \leq x \leq L(x)$ 供电区间内,依据基尔霍夫电压定律闭合回路电压代数和为 0,对图 2 中电压节点图 2(a)、(c)、(e) 推导可得:

$$\begin{aligned} U_{G1}(x) + dU_{G1}(x) + I_{P1}(x)R_P &= U_{G1}(x) + I_{G1}(x)R_G \\ U_{P1}(x) + dU_{P1}(x) + I_{D1}(x)R_D &= U_{P1}(x) + I_{P1}(x)R_P \\ U_{D1}(x) + dU_{D1}(x) &= U_{D1}(x) + I_{D1}(x)R_D \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $U_{G1}(x)$ 、 $U_{P1}(x)$ 、 $U_{D1}(x)$ 分别为 $0 \leq x \leq L(x)$ 供电区间内钢轨与排流网电压、排流网与结构钢筋电压、结构钢筋对地电压, V。

依据基尔霍夫电流定律流入该节点电流之和等于流出该节点电压之和,对图 2 中电流节点图 2(b)、(d)、(f) 推导可得:

$$\begin{aligned} I_{G1}(x) &= I_{G1}(x) - dI_{G1}(x) + U_{G1}(x)g_0 dx \\ I_{P1}(x) &= I_{P1}(x) - dI_{P1}(x) + U_{P1}(x)g_1 dx \\ I_{D1}(x) &= I_{D1}(x) - dI_{D1}(x) + U_{D1}(x)g_2 dx \end{aligned} \quad (3)$$

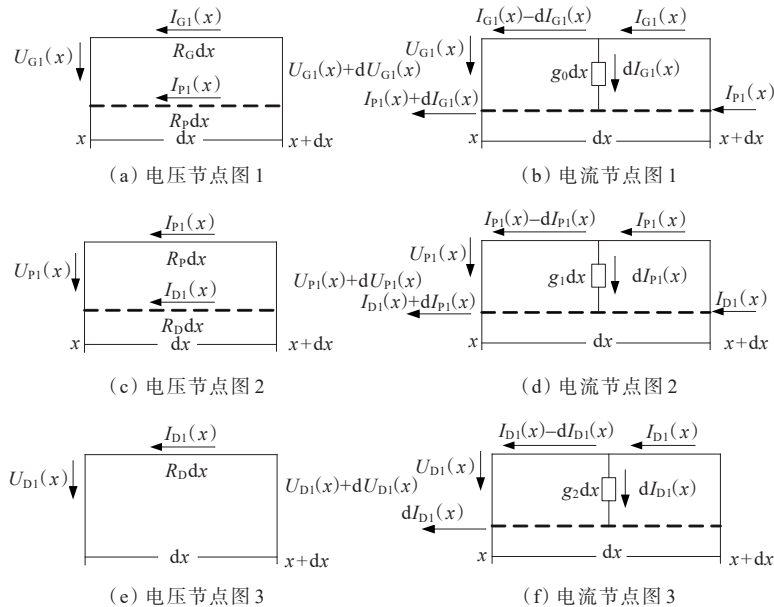


图 2 电压节点与电流节点图

Figure 2 Voltage nodes and current nodes

$$\frac{dy(x)}{dx} = M \times y(x) + f \quad (4)$$

$$y(x) = \begin{bmatrix} U_{G1}(x) \\ U_{P1}(x) \\ U_{D1}(x) \\ I_{G1}(x) \\ I_{P1}(x) \\ I_{D1}(x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & R_G & -R_P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_P & -R_D \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_D \\ g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -I_1 R_D \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

非齐次微分方程边界条件如下:

$$\begin{cases} I_{G1}(0) = I_1 \\ I_{P1}(0) = 0 \\ I_{D1}(0) = 0 \\ I_{G1}(L_1) = I_1 \\ I_{P1}(L_1) = 0 \\ I_{D1}(L_1) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $I_{G1}(0)$ 、 $I_{P1}(0)$ 、 $I_{D1}(0)$ 分别为列车在钢轨起点处的钢轨、排流网、结构钢筋电流, A; $I_{G1}(L_1)$ 、 $I_{P1}(L_1)$ 、 $I_{D1}(L_1)$ 分别为列车行驶至钢轨中点 L_1 处的钢轨、排流网、结构钢筋电流, A。

$$\begin{bmatrix} U_{G1}(x) \\ U_{P1}(x) \\ U_{D1}(x) \\ I_{G1}(x) \\ I_{P1}(x) \\ I_{D1}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 e^{\lambda_1 x} \\ C_2 e^{\lambda_2 x} \\ C_3 e^{\lambda_3 x} \\ C_4 e^{\lambda_4 x} \\ C_5 e^{\lambda_5 x} \\ C_6 e^{\lambda_6 x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(4)~(9)中, f 为非齐次微分方程的一个特解; $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 为矩阵 M 的特征值; $[b_{1k} \ b_{2k} \ b_{3k} \ b_{4k} \ b_{5k} \ b_{6k}]^T$ ($k=1, 2, \dots, 6$) 为特征值 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ 对应的特征向量; $C_1 \sim C_6$ 为边界条件式(8)决定的系数。

在 $L(x) < x \leq L$ 供电区间内, 特征值的求法与 $0 \leq x \leq L(x)$ 时相同, 此时边界条件如下:

$$\begin{cases} I_{G2}(L-L_1)=I_2 \\ I_{P2}(L-L_1)=0 \\ I_{D2}(L-L_1)=0 \\ I_{G2}(L-L)=I_1 \\ I_{P2}(L-L)=0 \\ I_{D2}(L-L)=0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $I_{G2}(L-L_1)$ 、 $I_{P2}(L-L_1)$ 、 $I_{D2}(L-L_1)$ 分别为列车行驶至钢轨中点 L_1 处的钢轨、排流网、结构钢筋电流, A; $I_{G2}(L-L)$ 、 $I_{P2}(L-L)$ 、 $I_{D2}(L-L)$ 分别为列车行驶至钢轨终点 L 处的钢轨、排流网、结构钢筋电流, A。

同理, 可求得 $L(x) < x \leq L$ 供电区间内钢轨与排流网电压、排流网与结构钢筋电压、结构钢筋对地电压 $U_{G2}(x)$ 、 $U_{P2}(x)$ 、 $U_{D2}(x)$ 及钢轨、排流网、结构钢筋电流 $I_{G2}(x)$ 、 $I_{P2}(x)$ 、 $I_{D2}(x)$ 。

综上, 求得在整个供电区间 ($0 \leq x \leq L$) 的钢轨、排流网、结构钢筋电流及电位如下:

$$\begin{aligned} U_G(x) &= U_{G1}(x) + U_{G2}(x) \\ U_P(x) &= U_{P1}(x) + U_{P2}(x) \\ U_D(x) &= U_{D1}(x) + U_{D2}(x) \\ I_G(x) &= I_{G1}(x) + I_{G2}(x) \\ I_P(x) &= I_{P1}(x) + I_{P2}(x) \\ I_D(x) &= I_{D1}(x) + I_{D2}(x) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $U_G(x)$ 、 $U_P(x)$ 、 $U_D(x)$ 分别为 $0 \leq x \leq L$ 供电区间内 x 位置处的钢轨与排流网电压、排流网与结构钢筋电压、结构钢筋对地电压, V; $I_G(x)$ 、 $I_P(x)$ 、

$I_D(x)$ 分别为 $0 \leq x \leq L$ 供电区间内 x 位置处的钢轨、排流网、结构钢筋电流, A。

由式(11)可求得 $0 \leq x \leq L$ 供电区间的结构钢筋电位为 $U_D(x)$, 排流网电位为 $U_P(x) + U_D(x)$, 钢轨电位为 $U_G(x) + U_P(x) + U_D(x)$ 。

1.2 杂散电流引起变压器偏磁直流分析

牵引电流通过钢轨回流时钢轨紧固件泄漏到大地中, 多个点泄漏源电场叠加对附近变电站变压器产生偏磁影响, 如图3所示。

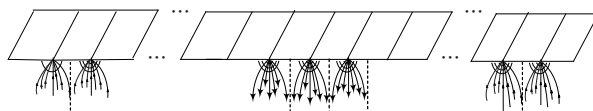


图3 钢轨电流泄漏示意图

Figure 3 Rail current leakage

流入沿线变电站变压器中性点电流大小为

$$\Delta I = (K_1 \Delta I_{M1} + K_2 \Delta I_{M2} + K_3 \Delta I_{M3} + \dots + K_n \Delta I_{Mn}) + \Delta I_s \quad (12)$$

式中, ΔI_{M1} 、 ΔI_{M2} 、 \dots 、 ΔI_{Mn} 为钢轨沿线泄漏点处流入大地中的电流; K_1 、 K_2 、 \dots 、 K_n 的取值与钢轨电位、土壤电阻率、变电站与轨道交通系统相对位置、排流网和结构钢筋现场构造以及变电站附近地电位有关, 导致其取值较难确定; ΔI_s 为变压器周围环境电场导致的中性点电流。

2 CDEGS 仿真模型

本文根据上海某变电站及其附近地铁运行轨迹利用 CDEGS 软件建立轨道交通-交流电网变电站耦合仿真模型^[22-23], 如图4所示。除 500 kV 变电站外, 各出线变电站距离轨道交通系统较远, 本文认定其超出轨道交通杂散电流影响范围。

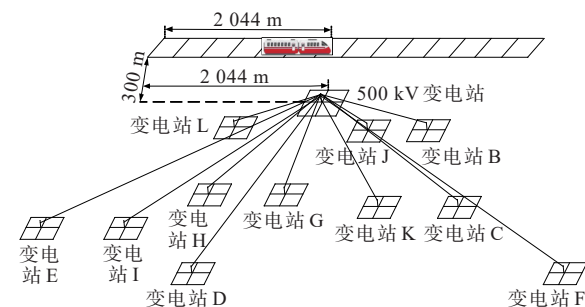
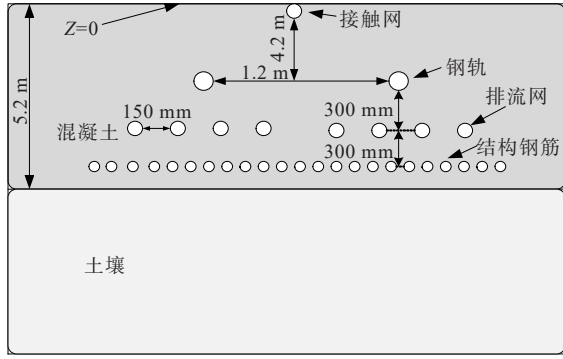


图4 轨道交通-交流电网变电站分布示意图

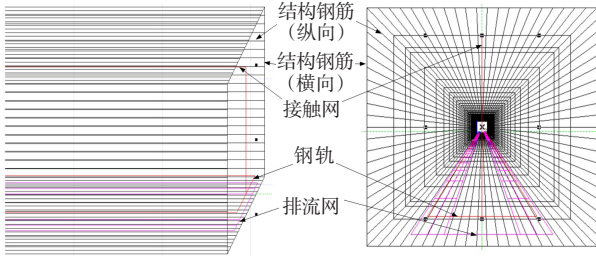
Figure 4 Distribution of "rail transit-AC power grid substation"

2.1 轨道交通系统仿真模型

轨道交通系统包括“接触网-钢轨-排流网-结构钢筋”4层结构, 如图5所示, 各层结构参数如表1^[24]所示。



(a) 轨道交通仿真模型示意图



(b) CDEGS 模型

图 5 轨道交通系统模型

Figure 5 Rail transit system model

表 1 CDEGS 模型各结构参数单位

Table 1 Structural parameter units of CDEGS model

钢轨			排流网		
数量/ 个	半径/ m	纵向电阻/ ($m\Omega \cdot km^{-1}$)	数量/ 个	半径/ m	纵向电阻/ ($m\Omega \cdot km^{-1}$)
2	0.08	0.02	6	0.02	0.05

续表 1

结构钢筋			接触网		
数量/ 个	半径/ m	纵向电阻/ ($m\Omega \cdot km^{-1}$)	半径/ m	涂层 类型	电阻/ ($m\Omega \cdot km^{-1}$)
20(钢轨下 层部分)	0.02	0.05	0.03	绝缘	0

2.2 交流电网变电站模型

交流电网系统中 500 kV 变电站有 11 条 220 kV 出线,如图 6 所示。本文依据相关数据建立“轨道交通-交流电网变电站”耦合仿真模型。

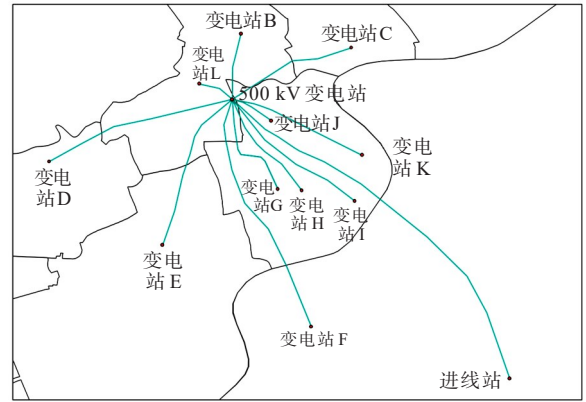


图 6 各变电站位置分布及接线图

Figure 6 Location distribution and wiring of each substation

3 轨道交通侧仿真结果对比

3.1 轨道交通系统仿真和解析模型对比分析

利用 MATLAB 软件对解析模型进行编程仿真,与 CDEGS 仿真结果的对比如图 7 所示,仿真参数如表 2 所示。

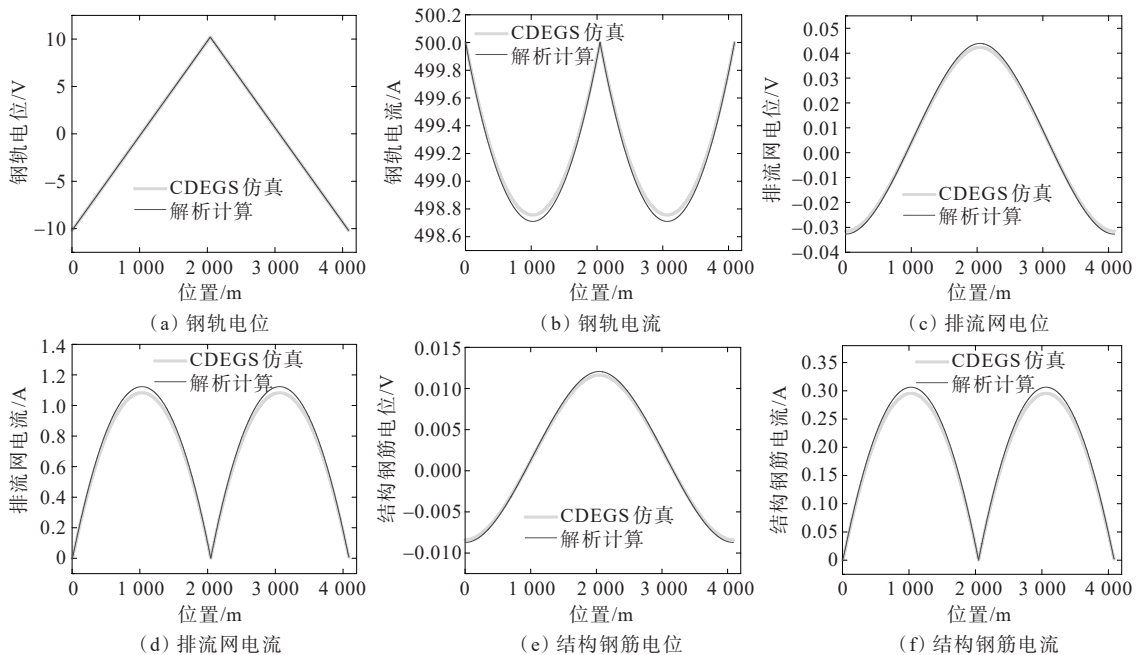


图 7 解析计算与 CDEGS 仿真结果

Figure 7 Analytical calculation and CDEGS simulation results

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

钢轨		排流网、结构钢筋			地铁
长度/ m	纵向电阻/ ($\text{m}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	过渡电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}$)	纵向电阻/ ($\text{m}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	过渡电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}$)	牵引电 流/A
4 088	20	40	60	0.5	2 000

钢轨、排流网、结构钢筋电位 CDEGS 仿真结果与解析计算电位最大偏差分别不超过 0.020 0、0.002 0、0.000 9 V，钢轨、排流网、结构钢筋电流 CDEGS 仿真结果与解析计算电位最大偏差分别不超过 0.110、0.064、0.012 A，由此可以证明 CDEGS 模型的正确性和适用性。

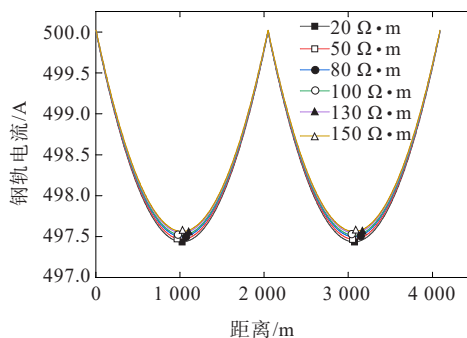
3.2 不同混凝土电阻率下 4 层结构电流和电位分布

轨道交通侧杂散电流存在“钢轨-混凝土-土壤”的泄漏路径，土壤结构层与钢轨并非直接接触，当混凝土、土壤结构层之间电阻率差异过大，会造成杂散电流在分界面处集中分布，对杂散电流在混凝土结构层及土壤中的分布造成影响，对轨道交通侧钢轨、排流网、结构钢筋的电位及电流分布影响很小，对轨道交通侧杂散电流进行研究时，仅对混凝土电阻率对其影响进行说明，土壤电阻率设置为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。结构钢筋电位、电流分布规律与排流网基本一致，以下省略对结构钢筋表述部分。

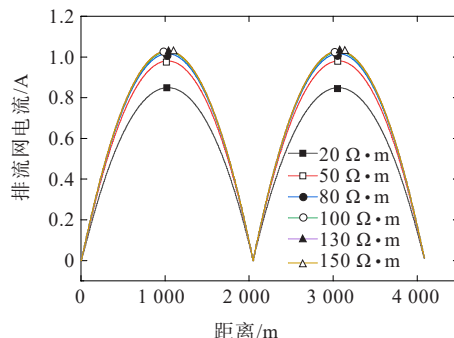
不同混凝土电阻率下钢轨电流分布如图 8(a) 所示，列车位置左右两侧钢轨电流呈类抛物线分布，钢轨两端与列车之间中点 1 022、3 066 m 位置附近钢轨电流最小。混凝土电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 时，钢轨电流最小为 497.404 A。钢轨纵向电阻与对地过渡电阻等效为并联电路关系，混凝土电阻率增大时，钢轨对地过渡电阻增大，混凝土结构层与金属钢轨导电性差异变大，钢轨电流不易泄漏混凝土结构层，钢轨电流增大。排流网、结构钢筋电流随混凝土电阻率变化的规律与钢轨相反，如图 8(b) 所示，混凝土电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 时，排流网电流最大为 0.823 A。

钢轨泄漏电流对排流网、结构钢筋影响存在“钢轨-混凝土-排流网-混凝土-结构钢筋-混凝土”多金属结构、多层土壤特性的复杂过程，随着混凝土电阻率增大，钢轨泄漏电流减小，但混凝土结构层与排流网导电性差异增大，金属排流网对杂散电流的吸附和屏蔽效应更强，杂散电流更易向排流网、结构钢筋等金属结构密集分布。当混凝土电阻率大于 $110 \Omega \cdot \text{m}$ 时，尽管杂散电流更易通过排流网流入排流柜，但钢轨泄漏电流总量减小较多，流入排流网

电流下降。结构钢筋电流分布与排流网基本一致，但结构钢筋距离钢轨相对排流网较远，结构钢筋电流对混凝土电阻率敏感度下降，当混凝土电阻率大于 $120 \Omega \cdot \text{m}$ 时，结构钢筋电流开始下降。



(a) 不同混凝土电阻率下钢轨电流分布

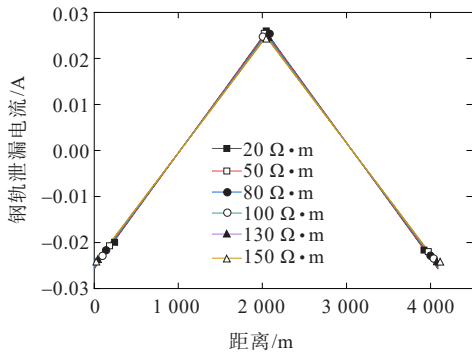


(b) 不同混凝土电阻率下排流网电流

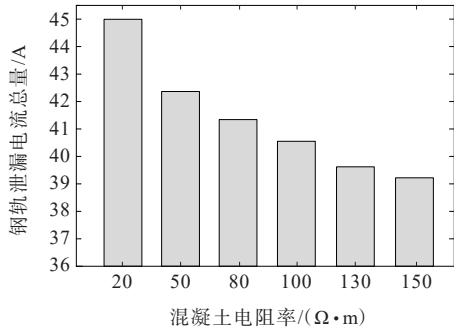
图 8 不同混凝土电阻率下轨道交通侧各结构层次电流分布
Figure 8 Current distribution at each structural level of rail transit side under different soil resistivity

不同混凝土电阻率下钢轨泄漏电流分布如图 9(a) 所示，钢轨泄漏电流主要取决于钢轨对地电位。钢轨对地电位为正时，钢轨电流泄漏到大地中，钢轨对地电位为负时，泄漏到大地中的杂散电流从此处回流至钢轨，从而使钢轨电流出现先减后增的类抛物线分布。混凝土电阻率越大，钢轨泄漏电流越小，列车位置处钢轨对地电位最高，泄漏电流最大。取钢轨对地电位为正的钢轨区间的泄漏电流进行积分得到不同混凝土电阻率的钢轨泄漏电流总量如图 9(b) 所示。

当土壤电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 时，总泄漏量为 44.99 A，随着混凝土电阻率增大，钢轨沿线泄漏电流减小，但同时伴随着钢轨电流增大、钢轨电位微幅升高、钢轨电流泄漏区间增大的矛盾过程，泄漏电流总量总体呈现减小趋势。不同混凝土电阻率下钢轨、排流网电位分布如图 10 所示，列车位置处钢轨对地电位最高，混凝土电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 时，列车位置处钢轨电位为 10.04 V。



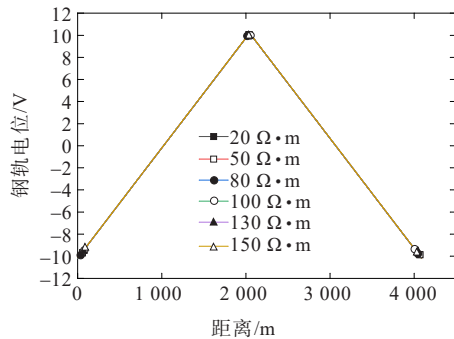
(a) 不同混凝土电阻率下钢轨沿线泄漏电流分布



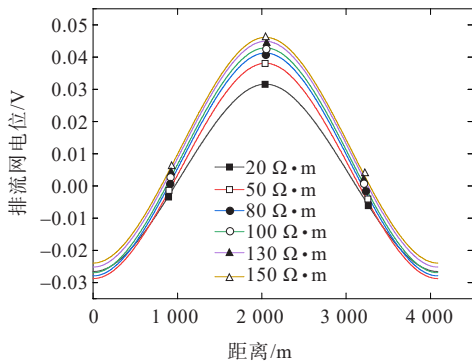
(b) 不同混凝土电阻率下钢轨泄漏电流总量

图 9 不同混凝土电阻率下钢轨泄漏电流

Figure 9 Rail current leakage under different soil resistivity



(a) 不同混凝土电阻率下钢轨电位



(b) 不同混凝土电阻率下排流网电位

图 10 不同混凝土电阻率下轨道交通侧各结构层次电位分布

Figure 10 Potential distribution at each structural level of rail transit side under different soil resistivity

钢轨电位差主要取决于钢轨回流电流幅值与钢轨纵向电阻,钢轨沿线回流电流受土壤电阻率影响较小,钢轨纵向电阻数量级较低,钢轨沿线电位随混凝土电阻率增大微幅增大。

混凝土电阻率对钢轨泄漏电流空间分布影响较大,且混凝土电阻率增大伴随钢轨泄漏电流总量减小,土壤与排流网和结构钢筋导电性差异增大的矛盾,导致排流网和结构钢筋电位受混凝土电阻率影响较大。混凝土电阻率为 $20 \Omega \cdot m$ 时,列车位置处排流网、结构钢筋电位分别为 0.046 、 0.032 V。随着混凝土电阻率增大,排流网、结构钢筋沿线各位置处对地电位增大且在列车位置处电位幅值增长最明显。

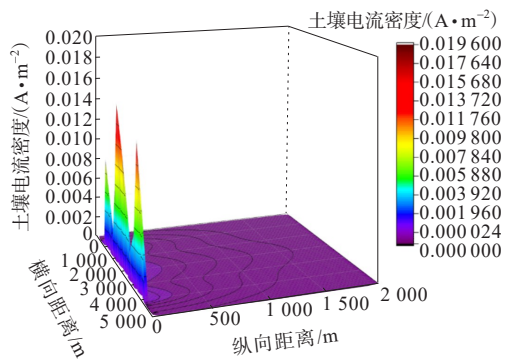
4 混凝土、土壤电阻率对杂散电流空间分布影响

钢轨泄漏电流通过“混凝土-土壤”在大地中流动分布,为研究混凝土、土壤电阻率对轨道交通系统杂散电流的空间分布及影响范围,本文基于上述电阻率数据进行仿真分析,研究轨道交通系统不同混凝土、土壤电阻率下杂散电流的空间分布及影响范围,利用 CDEGS 软件在钢轨侧下方设置长 6000 m、高 2000 m 的观测网。电流密度为矢量,本文探究的是土壤中杂散电流的存在性问题,可通过对比观测网上等电位及等电流密度幅值分布曲线来研究不同土壤特性下杂散电流的回流路径及影响范围。

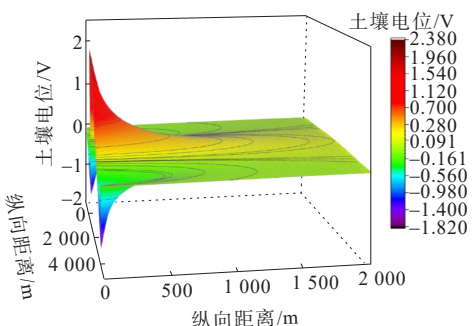
4.1 混凝土、土壤电阻率对杂散电流流动范围影响

混凝土、土壤电阻率分别为 10 、 $50 \Omega \cdot m$ 时观测网电流密度幅值分布如图 11(a) 所示,杂散电流并非以半圆柱均匀向外扩散,在钢轨对地电位过零点附近 (1022 、 3066 m) 处观测网电流密度幅值最小,列车位置附近电流密度幅值最大,可达 0.012 A/m²。观测网电位分布曲线见图 11(b) 所示,观测网电位分布与钢轨电位分布呈现出相同规律,在钢轨电位为正的区间内,观测网电位为正,反之为负,且在列车位置处观测网电位最大为 1.82 V。

不同混凝土、土壤电阻率下轨道交通沿线空间电场分布存在差异,以列车位置处下方观测网电流密度幅值和电位最大值为例进行说明,如图 12 所示,混凝土电阻率越小,钢轨泄漏电流越大,列车位置下方观测网电流密度幅值越大。观测网电流密度幅值最大值与混凝土(土壤)电阻率微分微量减小,但总体近似呈现线性分布。



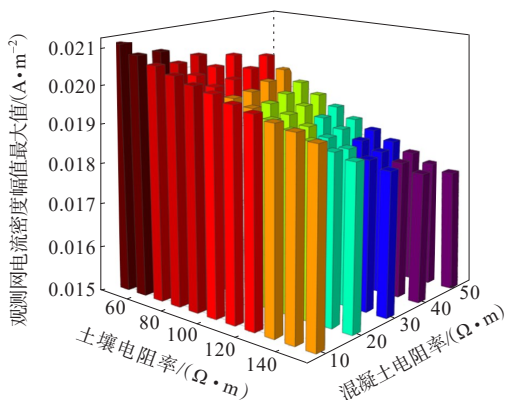
(a) 土壤电流密度分布图



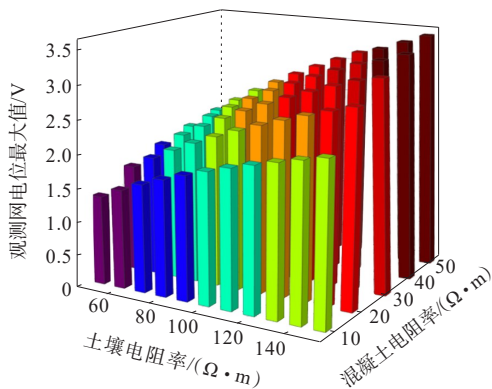
(b) 土壤电位三维分布图

图 11 土壤电流密度、电位分布图

Figure 11 Soil current density and potential distribution



(a) 观测网电流密度分布图



(b) 观测网电位分布图

图 12 观测网电流密度幅值、电位最大值

Figure 12 Current density amplitude and maximum potential of observation network

混凝土、土壤电阻率每增大 $10 \Omega \cdot m$, 电流密度幅值最大值分别减小 0.00031 、 0.00014 A/m^2 。电位大小与电流密度幅值、土壤电阻率乘积成正比, 随着混凝土电阻率增大, 观测网电流密度减小, 但电流密度幅值和电阻率乘积增大。

为研究杂散电流在混凝土与土壤分界面处的分布特性, 在钢轨正下方设置 50 m 观测线, 混凝土、土壤电阻率分别为 10 、 $50 \Omega \cdot m$ 时观测线电流密度幅值和电位变化如图 13 所示, 由钢轨向远侧的土壤电流密度和电位近似呈反函数减小。

如图 13 标注 1 所示, 排流网、结构钢筋对钢轨泄漏电流呈现出吸附和屏蔽效应, 排流网、结构钢筋处电流密度幅值出现升高突变, 混凝土电阻率越小, 此升高突变值越大。杂散电流幅值在混凝土与土壤分界面处出现峰值, 如图 13 标注 2 所示, 混凝土、土壤电阻率差异越大, 杂散电流在分界面法向分量越小, 切向分量越大, 越易在混凝土结构层分布, 分界面电流密度峰值越大。电位满足连续性, 不发生突变, 从而出现图 13 所示变化波形。

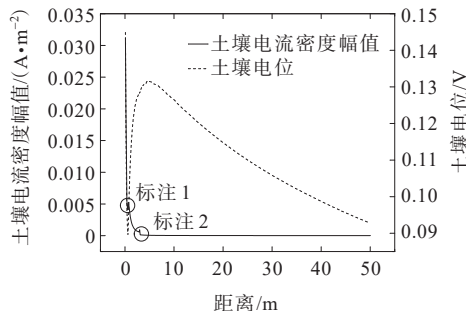


图 13 观测线电流密度幅值、电位分布曲线

Figure 13 Current density amplitude and potential distribution curves of observation line

当观测网电流密度幅值小于 $1 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$ 时认定土壤中无电流分布, 本文通过不同混凝土、土壤电阻率下观测网电流密度幅值等于 $1 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$ 分布曲线显示杂散电流影响范围, 如图 14 所示, 当混凝土、土壤电阻率分别为 10 、 $50 \Omega \cdot m$ 时, 列车位置处杂散电流影响范围最远, 可达 1421.33 m , 钢轨电位过零点附近影响范围为 1141.67 m , 钢轨两端影响范围为 921.32 m 。

混凝土、土壤电阻率越小, 影响范围越大, 且其对钢轨沿线不同位置处杂散电流流通范围的影响不同。以分布距离与混凝土或土壤电阻率的微分作为混凝土或土壤电阻率对杂散电流流动范围影响指标, 混凝土结构层电阻率对杂散电流在混凝土结构层分布范围影响较大, 可达 $1.52 \text{ m}/(\Omega \cdot m)$, 但

混凝土结构层仅为 7 m,对杂散电流总体分布范围影响很小。土壤电阻率对杂散电流在整条钢轨(0~4 088 m)纵向分布范围影响均较大,列车位置纵向最大,可达 1.42 m/(Ω·m)。

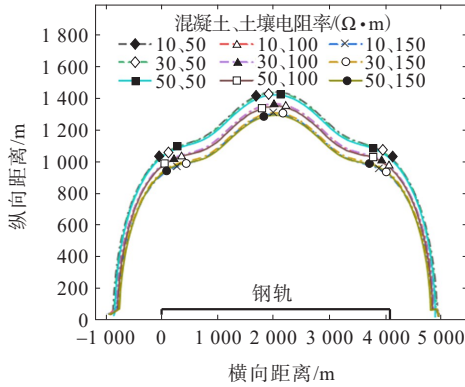


图 14 杂散电流空间分布范围

Figure 14 Spatial distribution range of stray current

杂散电流在混凝土、土壤结构层分界面密集分布,若其流通过程改变,分界面处影响范围将减小,且混凝土土壤电阻率相差越大,分界面处影响范围减小越大。当混凝土、土壤电阻率均为 50 Ω·m 时,分界面处电流密度幅值曲线均匀变化。实际土壤的不均匀性和电容特性,或土壤中存在的其他低电位接地体,均会干扰杂散电流的回流路径及影响范围,使其小于仿真结果。

本文依据轨道交通杂散电流空间分布规律对其影响范围做归纳推导,土壤结构层位置 z 处电位及电流密度如下:

$$\begin{cases} v_z = \frac{\rho W_1 \Delta I_{M1}}{2\pi z_1} + \frac{\rho W_2 \Delta I_{M2}}{2\pi z_2} + \dots + \frac{\rho W_m \Delta I_{Mm}}{2\pi z_m} \\ v_z = \int_A \dot{E}_z dz \\ \dot{\delta}_z = \sigma \dot{E}_z = \frac{\dot{E}_z}{\rho} \end{cases} \quad (13)$$

式中, ρ 为土壤结构层电阻率; v_z 、 $\dot{\delta}_z$ 分别为土壤结构

层空间位置 z 处电位及电流密度; $W_1 \sim W_m$ 为钢轨泄漏电流经混凝土结构层泄漏到土壤结构层的比例大小; $z_1 \sim z_m$ 为钢轨各泄漏点到土壤结构层空间位置 z 的距离。通过限定 $|\dot{\delta}_z| \leq 1 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$ 即可得到电流密度的影响范围。

4.2 不同混凝土、土壤电阻率下的接地网偏磁直流

地铁运行时产生的杂散电流通过大地侵入交流电网变电站,从而使变压器出现偏磁现象,混凝土、土壤电阻率分别设置为 10、50 Ω·m 时观测网电流密度分布如图 15 所示,变电站附近等电流密度曲线向轨道侧凹陷,变电站附近电流密度较大,电流密度幅值曲线更密集,电场强度大于土壤其他区域,此时变压器中性点偏磁直流为 4.163 A,占钢轨泄漏电流总量的 8.89%。

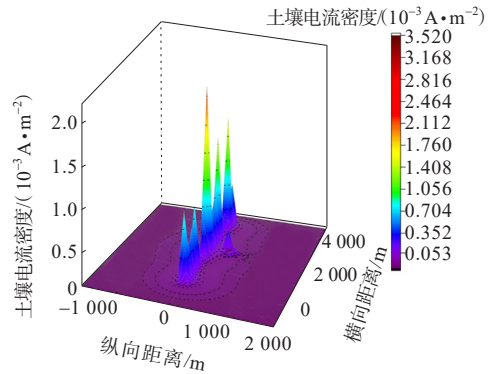


图 15 不同土壤电阻率下观测网电流密度分布

Figure 15 Current density distribution of observation network under different soil resistivity

不同混凝土、土壤电阻率组合下钢轨泄漏电流流入变电站变压器中性点比例及偏磁直流大小如表 3 所示,变压器中性点偏磁直流与土壤电阻率微分约为 0.087 A/(Ω·m),近似呈现线性关系。随着混凝土、土壤电阻率的增大,钢轨泄漏电流流入变压器中性点比例分别呈现增大和减小趋势。

表 3 不同“混凝土-土壤”电阻率下的变压器偏磁直流

Table 3 DC magnetic bias of transformer under different “concrete-soil” resistivity

土壤电阻率/(Ω·m)	混凝土电阻率/(Ω·m)									
	10		20		30		40		50	
	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%
50	4.063	8.68	4.102	9.12	4.092	9.33	4.066	9.45	4.035	9.52
60	3.937	8.41	4.016	8.93	4.011	9.14	3.986	9.26	3.957	9.34
70	3.844	8.21	3.935	8.75	3.932	8.96	3.910	9.08	3.881	9.16
80	3.756	8.02	3.857	8.57	3.858	8.79	3.836	8.91	3.808	8.99

续表 3

土壤电阻率/($\Omega \cdot m$)	混凝土电阻率/($\Omega \cdot m$)									
	10		20		30		40		50	
	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%	偏磁直 流/A	百分 比/%
90	3.672	7.85	3.783	8.41	3.787	8.63	3.766	8.75	3.739	8.82
100	3.593	7.68	3.712	8.25	3.719	8.48	3.700	8.59	3.673	8.67
110	3.519	7.52	3.646	8.10	3.655	8.33	3.636	8.45	3.610	8.52
120	3.448	7.37	3.582	7.96	3.593	8.19	3.576	8.31	3.550	8.38
130	3.380	7.22	3.521	7.83	3.534	8.05	3.518	8.17	3.492	8.24
140	3.316	7.09	3.463	7.70	3.478	7.93	3.463	8.04	3.438	8.11
150	3.255	6.95	3.407	7.57	3.424	7.80	3.411	7.92	3.385	7.99

4.3 不同混凝土、土壤电阻率下的动态运行偏磁直流

本文对不同混凝土、土壤电阻率下列车动态运行时变压器偏磁直流变化规律进行研究,为较好地显示仿真结果,设置列车从0 m位置处启动运行,变电站与轨道纵向距离300 m,横向距离0 m位置处500 m。地铁整个运行周期的牵引电流及速度变化曲线如图16所示,地铁启动过程包括恒加速、恒功率、自然加速特性3个阶段。本文对单辆列车动态运行研究时忽略制动过程的影响。不同混凝土、土壤电阻率下变压器中性点偏磁直流如图17所示,变压器中性点偏磁直流大小主要受列车牵引电流、列车与变电站相对位置、土壤电阻率影响。

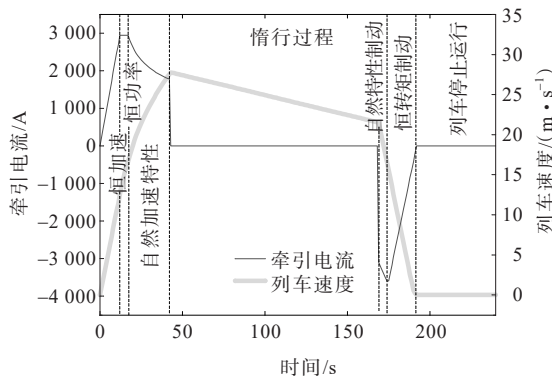


图16 地铁运行状况

Figure 16 Subway operation condition

表4 启动阶段变压器偏磁直流变化规律

Table 4 Variation rule of DC magnetic bias of transformer at startup stage

启动过程	牵引电流	列车与轨道500 m位置处距离	变压器中性点偏磁直流	杂散电流侵入变压器中性点比例
恒加速运行阶段	如图18(a)所示	如图19(a)所示	如图20(a)所示,变压器偏磁直流增大,且增长速率增大	如图21(a)所示,比例下降,且减小速率总体增大
恒功率启动阶段	如图18(b)所示	如图19(b)所示	如图20(b)所示,变压器偏磁直流近似线性增大	如图21(b)所示,比例近似线性减小
自然加速运行(18~33 s)	如图18(c)所示	如图19(c)所示	如图20(c)所示,变压器偏磁直流增大、增长速率变小,33 s时,偏磁直流达到最大为1.399 A	如图21(c)所示,比例下降,减小速率减小

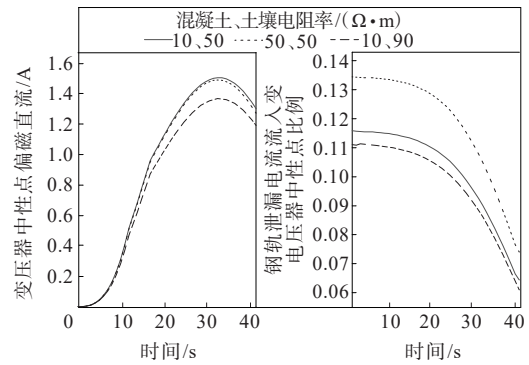


图17 不同混凝土、土壤电阻率下变压器中性点偏磁直流动态变化

Figure 17 Dynamic changes in DC magnetic bias of neutral point of transformer under different concrete and soil resistivity

当混凝土、土壤电阻率分别为10、50 $\Omega \cdot m$ 时,各阶段偏磁直流如表4、图18~21所示,变压器中性点偏磁直流随启动过程呈现先增后减的变化规律。列车动态运行中,不同时刻混凝土、土壤电阻率对变压器中性点偏磁直流影响不同,土壤电阻率对变压器中性点偏磁直流影响大于混凝土电阻率,混凝土电阻率相同时,土壤电阻率越小,流入变压器中性点偏磁直流及比例均增大,土壤电阻率相同时,混凝土电阻率越小,流入变压器中性点偏磁直流增大,但流入比例减小。

续表 4

启动过程	牵引电流	列车与轨道 500 m 位置处距离	变压器中性点偏磁直流	杂散电流侵入变压器中性点比例
自然加速运行 (34~42 s)	如图 18(d) 所示	如图 19(d)所示	如图 20(d)所示,偏磁直流减小,启动结束后减小至 0.963 8 A	如图 21(d)所示,比例下降,启动结束后减小至 6.44%

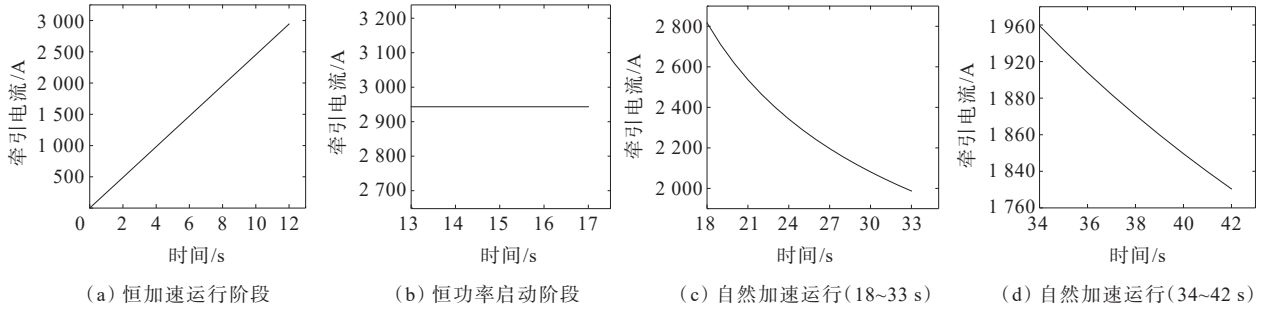


图 18 牵引电流

Figure 18 Traction current

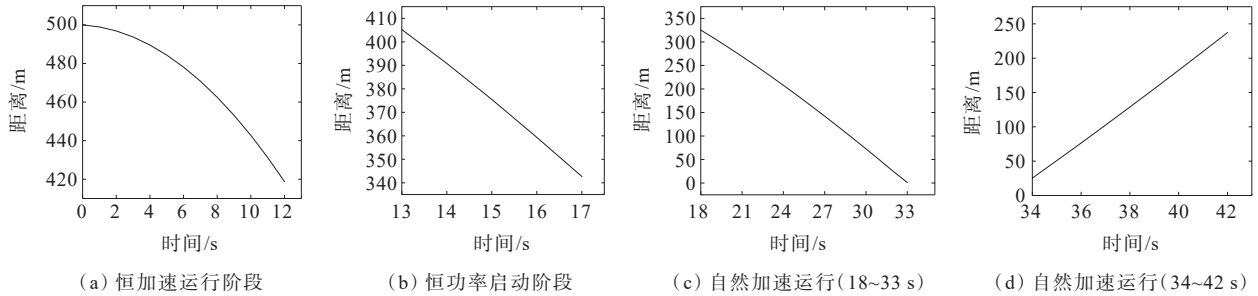


图 19 列车与轨道 500 m 位置处距离

Figure 19 Distance of 500 m between train and rail

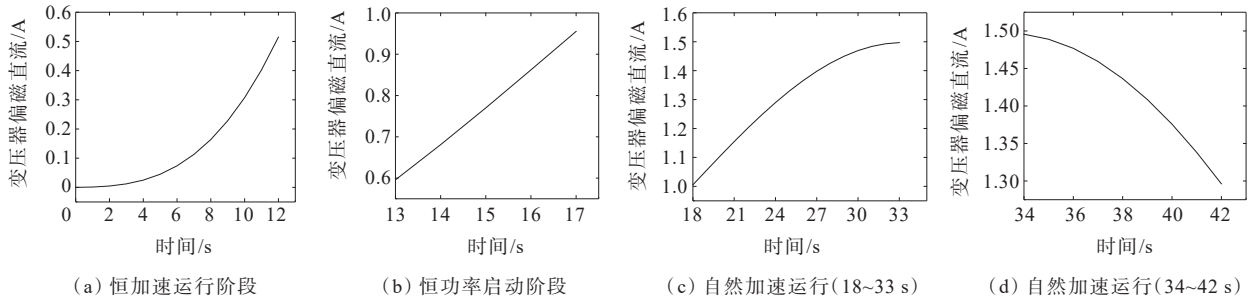


图 20 变压器中性点偏磁直流

Figure 20 DC magnetic bias of neutral point of transformer

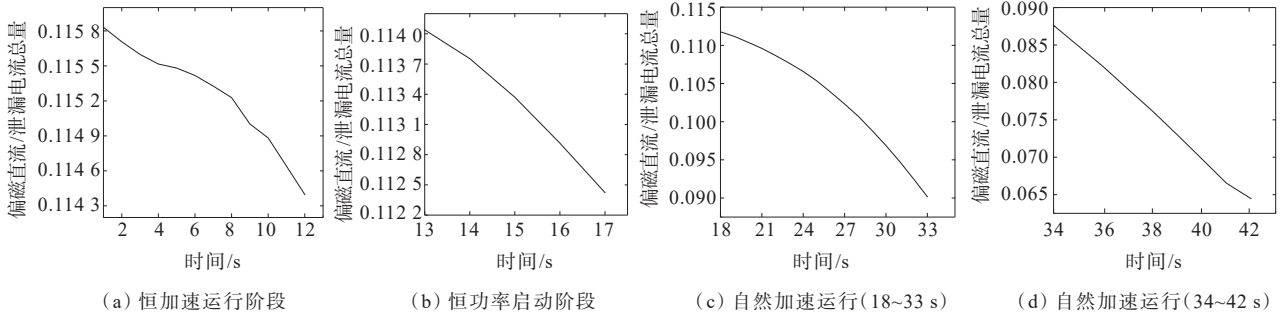


图 21 杂散电流侵入变压器中性点比例

Figure 21 Proportion of stray current intruding into neutral point of transformer

列车动态运行过程中,钢轨对地电位时刻变化,杂散电流大小、回流路径及影响范围随之改变,土壤电阻率对杂散电流分布的影响更为复杂,导致不同时刻土壤电阻率对变电站偏磁直流的影响程度不同,在此仿真模型中,列车行驶33 s至变电站附近时,变压器偏磁直流最大,为1.497 A,此时土壤电阻率对变压器中性点偏磁直流影响最大,以变压器偏磁直流与土壤电阻率微分作为影响指标,可达 $0.003\ 431\ \text{A}/(\Omega \cdot \text{m})$ 。

5 结语

本文通过建立双边供电电阻网络解析模型并对不同混凝土、土壤电阻率下轨道交通侧各结构层次电位、电流分布、杂散电流影响范围和地铁运行时杂散电流对交流电网变压器偏磁直流影响进行研究,得到如下结论。

1) 混凝土电阻率对钢轨、排流网、结构钢筋电位、电流分布及钢轨泄漏电流影响较大,土壤电阻率对杂散电流空间分布及变压器中性点偏磁直流影响显著。混凝土电阻率增大,钢轨电流增大,排流网和结构钢筋电流减小,钢轨泄漏电流总量呈现减小趋势。混凝土电阻率变化对钢轨电位变化几乎无影响,但排流网、结构钢筋电位均随土壤电阻率增大而增大。

2) 轨道交通沿线杂散电流并非以场的形式呈半圆柱均匀向外扩散,钢轨电位越高处杂散电流影响范围越大,当混凝土、土壤电阻率分别为 10 、 $50\ \Omega \cdot \text{m}$ 时,列车位置处杂散电流影响范围最远,可达 $1\ 421.33\ \text{m}$ 。以分布距离与土壤电阻率的微分作为土壤电阻率对杂散电流流动范围影响指标,土壤电阻率对杂散电流在整条钢轨($0\sim 4\ 088\ \text{m}$)纵向分布范围影响均较大,可达 $1.42\ \text{m}/(\Omega \cdot \text{m})$,而混凝土电阻率对杂散电流总体分布范围影响很小。

3) 变压器中性点偏磁直流与土壤电阻率微分约为 $0.087\ \text{A}/\Omega \cdot \text{m}$,近似呈线性关系。随着混凝土和土壤电阻率增大,钢轨泄漏电流流入变压器中性点的比例分别呈现增大和减小趋势。

4) 土壤电阻率对变压器中性点偏磁直流影响大于混凝土电阻率,混凝土电阻率相同时,土壤电阻率越小,流入变压器中性点偏磁直流及比例均增大,土壤电阻率相同时,混凝土电阻率越小,流入变压器中性点偏磁直流增大,但流入比例减小。

5) 在此仿真模型中,列车行驶33 s至变电站附

近时,变压器偏磁直流最大,为 $1.497\ \text{A}$,此时土壤电阻率对变压器中性点偏磁直流影响最大,以变压器偏磁直流与土壤电阻率微分作为影响指标,可达 $0.003\ 431\ \text{A}/(\Omega \cdot \text{m})$ 。

参考文献:

- [1] 刘燕,王京梅,赵丽,等.地铁杂散电流分布的数学模型[J].工程数学学报,2009,26(4):571-576.
LIU Yan, WANG Jingmei, ZHAO Li, et al. Mathematical model of distribution of metro stray current[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2009, 26(4): 571-576.
- [2] 吴天逸,冯楠,高凯,等.轨道交通影响下上海电网直流偏磁多参量监测及治理研究[J].高压电器,2023,59(11):84-91.
WU Tianyi, FENG Nan, GAO Kai, et al. Research on multi parameters monitoring and suppression of DC bias in Shanghai power grid under influence of rail transit[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 84-91.
- [3] YU J G. The effects of earthing strategies on rail potential and stray currents in DC transit railways[C]// International Conference on Developments in Mass Transit Systems. London, UK, 1998.
- [4] 庞源冰.城市轨道交通杂散电流研究[D].成都:西南交通大学,2008.
PANG Yuanbing. Study on stray current of urban rail transit and rail potential suppression measures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [5] 李威.地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2004.
LI Wei. Monitoring and protection technology of stray current corrosion in subway[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2004.
- [6] 曹阿林.埋地金属管线的杂散电流腐蚀防护研究[D].重庆:重庆大学,2010.
CAO Alin. Protection against stray current corrosion of buried metals pipeline[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [7] 吴书煜,汲胜昌,孙建涛,等.在运换流变压器振动监测及其变化规律[J].高电压技术,2022,48(4):1561-1570.
WU Shuyu, JI Shengchang, SUN Jiantao, et al. Vibration monitoring and variation law of converter transformer in operation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1561-1570.
- [8] 熊奇,王沐雪,黄浩,等.复杂地质情况下接地极土壤模型建立及研究[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2269-2277.
XIONG Qi, WANG Muxue, HUANG Hao, et al. Establishment of earth model for HVDC earth electrode in complicated terrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2269-2277.

- [9] 苗浩铭,申巍,曹雯,等.连续冲击作用下不同土壤地区接地装置的散流特性研究[J].电网与清洁能源,2022,38(11):71-79+87.
MIAO Haoming, SHEN Wei, CAO Wen, et al. A study on dispersion characteristics of grounding devices in different soil areas under continuous impact[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 71-79+87.
- [10] 曾嵘,陈水明. CDEGS 软件包及其在多层土壤接地设计中的应用[J].华东电力,1998,26(6):27-32.
ZENG Rong, CHEN Shuiming. CDEGS software package and its application in multi-layer soil grounding design[J]. East China Electric Power, 1998, 26(6): 27-32.
- [11] ALAMUTI M M, NOURI H, JAMALI S. Effects of earthing systems on stray current for corrosion and safety behaviour in practical metro systems[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2011, 1(2): 69-79.
- [12] 胡士信. 阴极保护工程手册[M].北京:化学工业出版社,1999.
HU Shixin. Handbook of cathodic protection engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.
- [13] 朱峰,李嘉成,曾海波,等.城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响[J].高电压技术,2018,44(8):2738-2745.
ZHU Feng, LI Jiacheng, ZENG Haibo, et al. Influence of rail-to-ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2738-2745.
- [14] 王爱民,林圣,李俊逸,等.城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J].高电压技术,2020,46(4):1379-1386.
WANG Aimin, LIN Sheng, LI Junyi, et al. Stray current simulation model of the long line of DC metro systems [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1379-1386.
- [15] 杜贵府,张栋梁,王崇林,等.直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J].电工技术学报,2016,31(11):129-139.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 129-139.
- [16] 刘炜,娄颖,张戩,等.计及城市轨道交通逆变回馈装置的交直流统一供电计算[J].电工技术学报,2019,34(20):4381-4391.
LIU Wei, LOU Ying, ZHANG Jian, et al. Unified AC/DC power supply calculation taking into account urban rail inverter feedback devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4381-4391.
- [17] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [18] 胡颖.城市轨道交通供电系统对电网的影响及控制[J].建材技术与应用,2020(1):38-41.
HU Ying. Influence and control of urban rail transit power supply system on power grid[J]. Research & Application of Building Materials, 2020(1): 38-41.
- [19] 阮羚,唐泽洋,张波,等.城市轨道交通杂散电流与电网直流偏磁电流耦合关系与检测的研究展望[J].湖北电力,2021,45(2):33-48.
RUAN Ling, TANG Zeyang, ZHANG Bo, et al. Research and prospect of detection and coupling relationship between stray current in urban rail transit and grid DC bias magnetic current[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(2): 33-48.
- [20] 彭平,曾祥君,倪砚茹,等.考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):192-198.
PENG Ping, ZENG Xiangjun, NI Yanru, et al. Modeling for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 192-198.
- [21] 刘君,牛唯,赵露,等.基于振动信号的城市电网变压器直流偏磁状态辨识方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):169-178.
LIU Jun, NIU Wei, ZHAO Lu, et al. State identification method for transformer of urban power grid under DC bias based on vibration signal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 169-178.
- [22] 黄华,陈璐,吴天逸,等.城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J].电网技术,2022,46(11):4524-4533.
HUANG Hua, CHEN Lu, WU Tianyi, et al. Influence of dynamic operation of urban rail transit on DC magnetic bias of AC power grid transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4524-4533.
- [23] 孙晓鹏,张宇华,暴家良,等.城市轨道交通杂散电流对沿线变电站偏磁特性的影响研究[J].机车电传动,2023(4):107-116.
SUN Xiaopeng, ZHANG Yuhua, BAO Jialiang, et al. Research on the influence of stray current from urban rail transit on the magnetic bias characteristics of substations along the line[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(4): 107-116.
- [24] 汪佳.多列车运行下地铁杂散电流分布研究[D].成都:西南交通大学,2012.
WANG Jia. Study on distribution of metro stray current based on multi-locomotive operation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.